

**PENGUBAHSUAIAN PENJANA ARUHAN SATU
FASA UJAAN SENDIRI MENGGUNAKAN
MOTOR SANGKAR TUPAI**

SAFRIZAL

**UNIVERSITI SAINS MALAYSIA
DISEMBER 2010**

**PENGUBAHSUAIAN PENJANA ARUHAN SATU FASA UJAAAN SENDIRI
MENGUNAKAN MOTOR SANGKAR TUPAI**

oleh

SAFRIZAL

**Tesis yang diserahkan untuk
memenuhi keperluan bagi
Ijazah Sarjana Sains**

DISEMBER 2010

**PENGUBAHSUAIAN PENJANA ARUHAN SATU FASA UJAAAN SENDIRI
MENGUNAKAN MOTOR SANGKAR TUPAI**

oleh

SAFRIZAL

**Tesis yang diserahkan untuk
memenuhi keperluan bagi
Ijazah Sarjana Sains**

Disember 2010

PENGHARGAAN

Dengan nama Allah yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji bagi Allah Tuhan seru sekalian alam kerana dengan rahmat dan izinNya, saya berjaya menyiapkan penyelidikan dan tesis ini sebagai memenuhi keperluan pengijazahan peringkat sarjana.

Saya ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan dan ribuan terima kasih kepada Professor Madya Dr.Soib bin Taib, di atas segala bimbingan dan tunjuk ajar serta bantuannya yang tak ternilai selama saya menuntut ilmu di Universiti Sains Malaysia. Sekalung penghargaan juga saya sampaikan kepada kawan-kawan pelajar ijazah tinggi bidang elektrik kuasa dan juruteknik makmal kuasa di atas bantuan yang diberikan kepada saya. Perhargaan dan terima kasih juga saya sampaikan kepada Dekan Pusat Pengajian Kejuruteraan Elektrik & Elektronik dan seluruh staf yang telah menyediakan segala kelengkapan dan memberi bantuannya kepada saya.

Tidak dilupakan buat ibunda dan ayahanda yang amat prihatin. Begitu juga dengan adik beradik yang sentiasa menyokong tindakan saya walau dalam apa jua keadaan sekalipun.

Akhir sekali saya sampaikan terima kasih kepada istri tercinta dan anak-anak tersayang di atas dorongan semangat, kesetiaan dan pengorbanannya menunggu saya selama menuntut ilmu di Pusat Pengajian Kejuruteraan Elektrik & Elektronik Universiti Sains Malaysia.

Kehadirat Allah saya mohonkan do'a semoga yang saya sebutkan di atas mendapat balasan amal dan limpahan rahmat atas segala keikhalasannya. Semoga apa yang diperoleh daripada penyelidikan ini dapat dikongsi bersama dan boleh dimanfaatkan untuk kepentingan bersama. Amin ya rabbal alamin.

Sekian, wassalam.

SUSUNAN KANDUNGAN

	Muka surat
PENGHARGAAN	ii
JADUAL KANDUNGAN	iii
SENARAI JADUAL	vii
SENARAI RAJAH	viii
SENARAI PLAT	xi
SENARAI LAMBANG	xii
SENARAI SINGKATAN	xvi
TERJEMAHAN ISTILAH	xvii
ABSTRAK	xxi
ABSTRACT	xxii
 BAB SATU - PENGENALAN	
1.0 Latarbelakang permasalahan	1
1.1 Objektif dan skop penyelidikan	3
1.2 Metodologi penyelidikan	3
1.3 Tinjauan tesis	4
 BAB DUA - PENJANA ARUHAN SATU-FASA UJAAN SENDIRI	
2.0 Pengenalan	6
2.1 Penjana aruhan satu fasa	8
2.1.1 Penjana aruhan satu belitan	8
2.1.2 Penjana aruhan dua belitan	9
2.2 Pemuat ujaan sendiri C_{sh}	10
2.3 Penentuan nilai pemuat ujaan sendiri C_{sh}	11

2.3.1	Penentuan nilai pemuat ujaan melalui nilai kuasa regangan motor	11
2.3.2	Penentuan nilai pemuat ujaan melalui lengkung pemagnetan	12
2.3.2(a)	Ujian tanpa beban voltan berubah	13
2.3.2(b)	Ujian kelajuan segerak	14
2.4	Penentuan pemuat ujaan melalui persamaan daya gerak magnet	16
2.5	Pemuat siri C_s	18
2.6	Kesan perubahan frekuensi	19
2.7	Faktor yang mempengaruhi frekuensi penjana	20
2.8	Ujaan dan pembinaan voltan	21
2.9	Model keadaan mantap	25
2.10	Penentuan parameter penjana	33
2.10.1	Ujian arus terus	33
2.10.2	Ujian tanpa beban	34
2.10.3	Ujian pemutar terkunci	37

BAB TIGA - PENGUBAHSUAIAN PENJANA ARUHAN SATU FASA UJAAN SENDIRI

3.0	Pendahuluan	42
3.1	Motor aruhan satu fasa	42
3.2	Penentuan nilai pemuat ujaan C_{sh}	45
3.2.1	Penentuan nilai pemuat ujaan melalui kuasa regangan motor	45
3.2.2	Penentuan nilai pemuat ujaan melalui ujian motor tanpa beban pada keadaan voltan malar	48
3.2.3	Penentuan nilai pemuat ujaan melalui lengkung pemagnetan	51
3.2.3(a)	Ujian motor tanpa beban	51
3.2.3(b)	Ujian motor kelajuan segerak	55
3.3	Penentuan nilai pemuat siri C_s	59

3.4	Eksperimen penjana aruhan ujaan sendiri	60
3.4.1	Ujian penjana tanpa beban	60
3.4.2	Ujian penjana berbeban tanpa pemuat siri C_s	63
3.4.2(a)	Beban berintangan tulin	63
3.4.2(b)	Beban beraruhan tulin	66
3.4.3	Ujian penjana berbeban dengan pemuat siri C_s	67
3.4.3(a)	Beban berintangan tulin	68
3.4.3(b)	Beban beraruhan tulin	70
3.5	Aplikasi penjana aruhan pada beban rumah	71
3.5.1	Ujian beban lampu mentol dengan pemuat siri C_s	72
3.5.2	Ujian beban lampu floresen dengan pemuat siri C_s	72
3.5.3	Ujian beban lampu jimat kuasa dengan pemuat siri C_s	73
3.5.4	Ujian beban kipas angin dengan pemuat siri C_s	73
3.6	Ujian penjana aruhan dengan gabungan beban rumah	74

BAB EMPAT - KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

4.0	Pendahuluan	76
4.1	Ciri penjana tanpa beban	76
4.2	Ciri penjana berbeban	80
4.2.1	Penjana dengan beban berintangan tulin tanpa pemuat siri C_s	81
4.2.2	Penjana dengan beban beraruhan tulin tanpa pemuat siri C_s	83
4.2.3	Penjana dengan beban berintangan tulin dengan pemuat siri C_s	85
4.3	Prestasi penjana dengan beban rumah	88
4.3.1	Beban lampu mentol	88
4.3.2	Beban lampu floresen	91

4.3.3	Beban lampu jimat kuasa	92
4.4	Gabungan beban rumah	95
4.5	Kos rekabentuk penjana	98

BAB LIMA - KESIMPULAN

5.0	Kesimpulan	99
5.1	Cadangan	100

SENARAI RUJUKAN	101
------------------------	-----

LAMPIRAN

Lampiran A : Ujian Menentukan Parameter Penjana	104
Lampiran B : Pekali Persamaan Penjana dalam Keadaan Mantap	112
Lampiran C : Hasil Ujian Beban Berintangan Tulin dengan Pelbagai Nilai Pemuat Siri C_s	116
Lampiran D : Hasil Ujian Beban Lampu Mentol dengan Pelbagai Pemuat Siri C_s	118
Lampiran E : Hasil Ujian Beban Lampu Floresen dengan Pelbagai Pemuat Siri C_s	120
Lampiran F : Hasil Ujian Beban Lampu Jimat Kuasa dengan Pelbagai Pemuat Siri C_s	121
Lampiran G : Hasil ujian beban gabungan rumah dengan pelbagai pemuat siri C_s	122

SENARAI JADUAL

		Muka surat
Jadual 3.1	Hasil pengukuran kuasa regangan motor aruhan satu fasa	46
Jadual 3.2	Hasil ujian tanpa beban voltan bekalan malar	48
Jadual 3.3	Hasil ujian tanpa beban	52
Jadual 3.4	Hasil ujian motor kelajuan segerak untuk belitan utama dan belitan sokongan	56
Jadual 3.5	Nilai pemuat ujaan dari beberapa jenis ujian	60
Jadual 3.6	Hasil ujian penjana tanpa beban dengan pelbagai pemuat ujaan pada belitan sokongan	62
Jadual 3.7	Hasil ujian penjana tanpa beban dengan pelbagai pemuat ujaan pada belitan utama	62
Jadual 3.8	Hasil ujian beban berintangan tulin tanpa pemuat siri C_s	65
Jadual 3.9	Hasil ujian beban beraruhan tulin pada kelajuan 1660 rpm tanpa pemuat siri C_s	67
Jadual 3.10	Hasil ujian beban berintangan tulin dengan pemuat siri $100\mu F$	69
Jadual 3.11	Hasil ujian beban beraruhan tulin pada kelajuan 1660 rpm dengan pemuat siri $100\mu F$	70
Jadual 3.12	Hasil ujian beban lampu mentol dengan pemuat siri $100\mu F$	72
Jadual 3.13	Hasil ujian beban lampu floresen dengan pemuat siri $100\mu F$	73
Jadual 3.14	Hasil ujian beban lampu jimat kuas dengan pemuat siri $100\mu F$	73
Jadual 3.15	Hasil ujian beban kipas angin dengan pemuat siri $100\mu F$	74
Jadual 3.16	Hasil ujian gabungan beban rumah dengan pemuat siri $85\mu F$	75
Jadual 4.1	Prestasi pelbagai pemuat siri untuk beban berintangan tulin	86
Jadual 4.2	Nilai pengaturan voltan penjana untuk pelbagai pemuat siri dengan beban lampu mentol	89
Jadual 4.3	Tatarajah optimal gabungan beban rumah	95
Jadual 4.4	Maklumat kos komponen penjana aruhan satu fasa (2008)	98

SENARAI RAJAH

		Muka surat
Rajah 2.1	Ciri kelajuan tork mesin aruhan	7
Rajah 2.2	Litar penjana satu fasa satu belitan	9
Rajah 2.3	Litar penjana satu fasa dua belitan	9
Rajah 2.4	Litar ujian tanpa beban voltan masukan berubah-ubah	13
Rajah 2.5	Litar ujian kelajuan segerak	15
Rajah 2.6	Model motor aruhan satu fasa dua belitan pada frekuensi kadaran	19
Rajah 2.7	Kesan perubahan frekuensi pada motor aruhan	20
Rajah 2.8	Tork sebagai fungsi gelincir	21
Rajah 2.9	Keadaan pembinaan voltan penjana aruhan terencil	22
Rajah 2.10	Model litar penjana tanpa beban	23
Rajah 2.11	Gelombang keluaran tanpa beban dan gambarajah pemfasa	24
Rajah 2.12	Lengkung pemagnetan penjana aruhan satu fasa	25
Rajah 2.13	Litar setara motor aruhan satu fasa dua-belitan	26
Rajah 2.14	Ubahsuai litar setara motor aruhan satu fasa	26
Rajah 2.15	Litar setara keadaan mantap penjana aruhan satu fasa ujian sendiri	28
Rajah 2.16	Model litar penjana aruhan satu fasa	28
Rajah 2.17	Litar ujian arus terus belitan pemegun penjana	34
Rajah 2.18	Litar ujian tanpa beban penjana aruhan	36
Rajah 2.19	Litar setara ujian tanpa beban	36
Rajah 2.20	Litar ujian pemutar terkunci	39
Rajah 3.1	Litar motor aruhan satu-fasa	43
Rajah 3.2	Litar penjana aruhan satu fasa ujian sendiri	44
Rajah 3.3	Pengukuran kuasa regangan motor pada belitan utama	46
Rajah 3.4	Pengukuran kuasa regangan motor pada belitan sokongan	46

Rajah 3.5	Litar setara ujian tanpa beban motor aruhan satu fasa dengan nilai voltan malar	49
Rajah 3.6	Litar setara ujian tanpa beban	49
Rajah 3.7	Litar ujian tanpa beban motor aruhan satu fasa dengan bekalan voltan berubah-ubah	51
Rajah 3.8	Lengkung pemagnetan belitan utama ujian motor tanpa beban	53
Rajah 3.9	Lengkung pemagnetan belitan sokongan ujian tanpa beban	54
Rajah 3.10	Litar ujian motor kelajuan segerak	55
Rajah 3.11	Perubahan voltan celah udara V_{gf} terhadap arus pemagnetan I_m	58
Rajah 3.12	Lengkung regangan pemagnetan X_m belitan utama	58
Rajah 3.13	Lengkung regangan pemagnetan belitan sokongan	59
Rajah 3.14	Litar ujian penjana aruhan tanpa beban	61
Rajah 3.15	Litar ujian beban berintangan tulin tanpa pemuat siri	64
Rajah 3.16	Litar ujian penjana beban beraruhan tulin	66
Rajah 3.17	Litar ujian penjana beban berintangan tulin dengan pelbagai pemuat siri	68
Rajah 3.18	Litar ujian penjana beban beraruhan tulin dengan pelbagai pemuat siri	70
Rajah 4.1	Kesan pelbagai pemuat ujaan terhadap voltan keluaran pada kelajuan 1660 rpm	77
Rajah 4.2	Kesan pelbagai pemuat ujaan terhadap arus yang mengalir pada belitan sokongan	78
Rajah 4.3	Kesan pelbagai pemuat ujaan terhadap kuasa aktif pada belitan ujaan	79
Rajah 4.4	Perbandingan nilai pemuat ujaan terhadap voltan keluaran untuk belitan utama dan belitan sokongan	79
Rajah 4.5	Kesan pemuat ujaan terhadap kuasa regangan pada ujian belitan utama dan belitan sokongan	80
Rajah 4.6	Prestasi arus terhadap voltankeluaran dengan beban berintangan tulin tanpa pemuat siri	81
Rajah 4.7	Prestasi kuasa keluran terhadap voltan penjana dengan beban berintangan tulin tanpa pemuat siri	82

Rajah 4.8	Prestasi arus keluaran dan arus belitan ujaan dengan beban berintangan tulin tanpa pemuat siri	82
Rajah 4.9	Voltan dan arus sefasa dalam ujian beban berintangan tulin tanpa pemuat siri	83
Rajah 4.10	Kesan faktor kuasa beban berintangan tulin tanpa pemuat siri	84
Rajah 4.11	Prestasi penjana beban beraruhan tulin tanpa pemuat siri	85
Rajah 4.12	Kesan arus terhadap voltan keluaran penjana untuk pelbagai pemuat siri dengan beban berintangan tulin	87
Rajah 4.13	Kesan faktor kuasa beban dengan pelbagai pemuat siri beban berintangan tulin	88
Rajah 4.14	Kesan voltan keluaran terhadap nilai pemuat ujaan dengan beban lampu mentol	90
Rajah 4.15	Prestasi voltan penjana terhadap arus untuk pelbagai pemuat siri dengan beban lampu mentol	90
Rajah 4.16	Kesan arus beban dan arus ujaan untuk pemuat siri $100\mu F$ dengan beban lampu mentol	91
Rajah 4.17	Prestasi voltan keluaran terhadap arus dengan beban beraruhan untuk pelbagai pemuat siri	92
Rajah 4.18	Kesan kuasa keluaran terhadap voltan beban pada ujian lampu jimat kuasa dengan pelbagai pemuat siri	93
Rajah 4.19	Kesan kuasa keluaran terhadap arus pada beban lampu jimat kuasa	94
Rajah 4.20	Kesan kuasa terhadap terhadap kuasa aktif dan kuasa regangan belitan ujaan dengan beban lampu jimat kuasa	94
Rajah 4.21	Prestasi voltan keluaran terhadap arus untuk pelbagai pemuat siri dengan beban rumah tangga gabungan	96
Rajah 4.22	Kesan voltan keluaran terhadap nilai pemuat siri dengan beban rumah tangga gabungan	97
Rajah 4.23	Kesan kuasa terhadap arus dengan pelbagai pemuat siri untuk beban rumah tangga gabungan	97

SENARAI PLAT

		Muka surat
Plat 3.1	Ujian motor tanpa beban	54
Plat 3.2	Pengukuran kelajuan pemutar pada ujian kelajuan segerak	56
Plat 3.3	Ujian tanpa beban dengan pelbagai pemuat ujaan	62
Plat 3.4	Bank beban berintangan tulin	64
Plat 3.5	Ujian beban berintangan tulin tanpa pemuaat siri pada kelajuan 1660 rpm	65
Plat 3.6	Bank beban beraruhan tulin	67
Plat 3.7	Ujian beban berintangan tulin dengan pemuat siri pada kelajuan 1660 rpm	69
Plat 3.8	Ujian beban beraruhan tulin dengan pemuat siri pada kelajuan 1660 rpm	
Plat 3.9	Ujian gabungan beban rumah	

SENARAI LAMBANG

		Muka surat
n_s	Kelajuan segerak	6
f_s	Frekuensi segerak	6
n_r	Kelajuan pemutar	6
f_r	Frekuensi pemutar	6
p	Kutub pemegun	6
ω_r	Putaran pemutar	6
ω_s	Putaran pemegun	6
s	Gelincir	6
E_r	Voltan aruhan pada pemutar	7
E_{r0}	Voltan pemutar terkunci	7
E_2	Voltan pemegun	7
P	Kuasa aktif	8
Q	Kuasa regangan	8
I_L	Arus beban	8
V_T	Voltan pangkalan	9
I_M	Arus angker	9
I_C	Arus pemuat	9
V_m	Voltan pangkalan belitan pemegun	14
V_L	Voltan pangkalan beban	14
C_{sh}	Pemuat ujaan	15
C_S	Pemuat siri	15

Z_L	Galangan beban	15
I_m	Arus belitan utama	15
I_a	Arus belitan sokongan	15
N_m	Belitan utama	15
N_a	Belitan sokongan	15
V_a	Voltan pangkalan belitan sokongan	15
S	Kuasa ketara	17
X_C	Regangan berkemuatan	18
V_{NL}	Voltan tanpa beban	19
P_{NL}	Kuasa tanpa beban	19
I_{NL}	Arus tanpa beban	19
r_1	Rintangan belitan utama	19
r_2	Rintangan pemutar	19
x_1	Regangan belitan utama	19
x_2	Regangan pemutar	19
X_m	Regangan pemagnetan	19
V_{gf}	Voltan celah udara	19
V_{SP}	Voltan kelajuan segerak	21
P_{SP}	Kuasa kelajuan segerak	21
I_{SP}	Arus kelajuan segerak	21
Z_{in}	Galangan masukan	21
F	Frekuensi per unit	21
i_m	Arus ketika belitan utama	21

i_a	Arus ketika belitan sokongan	21
F_m	Daya gerak magnet belitan utama	21
F_a	Daya gerak magnet belitan sokongan	21
θ	Sudut fasa	22
t	Waktu	22
L_m	Kearuhan belitan utama	22
L_a	Kearuhan belitan sokongan	22
ω	Kelajuan angular	22
R_L	Beban rintangan	23
ω	Kelajuan segerak pemutar	23
ω_B	Kelajuan dasar	23
W	Perbandingan kelajuan	23
f	Frekuensi terjana	23
f_B	Frekuensi kadaran	23
F	Perbandingan frekuensi/frekuensi per unit	23
X_L	Beban aruhan	24
R_C	Rintangan rugi-rugi teras	24
a	Perbandingan belitan sokongan dan belitan utama	24
T	Tork	26
N	Kutub magnet utara	26
S	Kutub magnet selatan	26
$I_{\phi g}$	Arus kemagnetan	26
V_{dc}	Voltan arus terus	37
I_{dc}	Arus terus	37

I_{ex}	Arus ujaan	39
I_{h+e}	Arus kerugian teras	39
V_{LR}	Voltan pemutar terkunci	41
I_{LR}	Arus pemutar terkunci	41
Z_{LR}	Galangan pemutar terkunci	41
X_{LR}	Regangan pemutar terkunci	42
Q_{NL}	Kuasa regangan tanpa beban	47
$\cos \theta_{NL}$	Perbezaan sudut fasa tanpa beban	47
V_o	Voltan keluaran penjana	65
I_o	Arus keluaran penjana	65
P_o	Kuasa aktif keluaran penjana	65
Q_o	Kuasa regangan keluaran penjana	65
pf	Faktor kuasa	65
V_{ex}	Voltan pangkalan ujaan	65
I_{ex}	Arus belitan ujaan	65
P_{ex}	Kuasa aktif belitan ujaan	65
Q_{ex}	Kuasa regangan belitan ujaan	65

SENARAI SINGKATAN

	Muka surat
<i>aua</i> Arus ulang alik	3
<i>at</i> Arus terus	3
<i>rpm</i> Revolution per minutes	6
<i>MMF</i> magnetomotive force	33

TERJEMAHAN ISTILAH

Bahasa Inggeris

Aci

Airgap

Alternative current

Alternative power

Angle phase

Ampere-turn

Apparent power

Armature current

Auxiliary winding

Backward field

Direct current

Direct current motor

Drop voltage

Capacitor

Capacitive

Capacitive current

Capacitive reactance

Capacitive reactive power

Collapse

Common load

Critical capacitance

Efficiency

Energy recovery

Energy saving lamp

Bahasa Melayu

Shaft

Celah udara

Arus ulang alik

Tenaga alternative

Sudut fasa

Belitan amper

Kuasa ketara

Arus angker

Belitan sokongan

Medan kebelakang

Arus terus

Motor arus terus

Kejatuhan voltan

Pemuat

Berkemuatan

Arus berkemuatan

Regangan berkemuatan

Kuasa regangan

berkemuatan

Roboh

Beban umum

Kemuatan genting

Kecekapan

Pemulihan tenaga

Lampu jimat kuasa

Emergency generator	Penjana kecemasan
Excitation capacitor	Pemuat ujaan
Excitation current	Arus ujaan
Excitation winding	Belitan ujaan
Exciting capacitance	Pemuatan ujaan
Field circuit	Litar medan
Florescent lamp	Lampu floresen
Flux linkages	Fluks penghubung
Forward field	Medan hadapan
Friction losses	Kehilangan geseran
Incandescent lamp	Lampu bulat
Induction generator	Penjana aruhan
Induction machine	Mesin aruhan
Induction motor	Motor aruhan
Inductive	Beraruhan
Inductive load	Beban beraruhan
Inductive reactance	Regangan beraruhan
Isolated asynchronous generator	Penjana aruhan terpencil
Lagging	Tertinggal
Leading	Mendahului
Load resistance	Rintangan beban
Locked rotor test	Ujian pemutar terkunci
Negative slip	Gelincir negatif
Main winding	Belitan utama
Magnetization current	Arus pemagnetan
Magnetatization curve	Lengkung pemagnetan
Magnetomotive force	Daya gerak magnet
Mechanical load resistor	Rintangan beban mekanik

Open circuit	Litar terbuka
Permanent magnet generator	Penjana magnet kekal
Portable	Mudah alih
Power factor correction	Pembetulan faktor kuasa
Prime mover	Penggerak utama
Pure load	Beban tulin
Pure inductive load	Beban beraruhan tulin
Pure resistive load	Beban berkemuatan tulin
Reactive power	Kuasa regangan
Renewable energy	Tenaga diperbaharui
Remnant flux	Fluks baki
Remnant rotor poles	Kutub pemutar baki
Residual magnetism	Magnet baki
Resistive	Berintangan
Resistive load	Beban berintangan
Rotating diode	Diod berputar
Rotor	Pemutar
Self-excitation	Ujaan sendiri
Self-excited induction generator	Penjana aruhan ujaan sendiri
Series capacitor	Pemuat siri
Single-phase	Satu-fasa
Shunt	Pirau
Shunt capacitor	Pemuat pirau
Slip	Gelincir
Slip ring	Gelang gelincir
Slope	Cerun
Synchronous generator	Penjana segerak

Synchronous speed	Kelajuan segerak
Synchronous speed test	Ujian kelajuan segerak
Squirrel-cage	Sangkar tupai
Terminal voltage	Pangkalan voltan
Torque	Tork
Torque speed characteristic	Ciri had laju tork
Voltage induce	Voltan teraruh
Voltage regulation	Pengaturan voltan
Wind energy	Tenaga angin
Windage losses	Kehilangan putaran
Windmill	Kincir angin
Pure load	Beban tulin

PENGUBAHSUAIAN PENJANA ARUHAN SATU FASA UJAAN SENDIRI MENGUNAKAN MOTOR SANGKAR TUPAI

ABSTRAK

Dalam penyelidikan ini diusulkan untuk mengubahsuai motor aruhan satu-fasa komersial 750 W menjadi satu penjana aruhan ujaan sendiri. Motor akan berfungsi sebagai penjana manakala diputar dengan kelajuan melebihi kelajuan segerak dan mempunyai bekalan ujaan. Dalam pengubahsuaian ini, kedua belitan pemegun motor, iaitu belitan sokongan dan belitan utama dipisahkan secara elektrik. Masing-masing belitan berfungsi sebagai belitan ujaan dan belitan pangkalan keluaran. Pemuat ujaan disambungkan secara pirau dengan belitan sokongan, dan pemuat yang lain disambungkan secara siri dengan beban. Nilai pemuat ujaan dapat ditentukan berdasarkan kuasa regangan, ujian motor tanpa beban dan melalui lengkung pemagnetan motor. Kuasa regangan penjana diukur ketika beroperasi sebagai motor. Lengkung pemagnetan didapat dengan melakukan ujian motor tanpa beban dengan voltan bekalan diubah-ubah dan ujian kelajuan segerak. Pemuat siri ditentukan melalui eksperimen dengan pelbagai beban sehingga kestabilan voltan keluaran dicapai. Untuk pengesahan penjana, ujian dengan pelbagai beban telahpun dilakukan. Beban yang diuji adalah beban tulin dan beban umum, baik yang bersifat berintangan mahupun beraruhan. Hasil ujian eksperimen dengan pelbagai jenis beban menunjukkan bahawa penjana mempunyai kemampuan untuk menghasilkan kuasa keluaran 607W atau 80.93% daripada kuasa kadaran dan voltan keluaran 221V dengan frekuensi 56.3 Hz pada kelajuan 1686 rpm. Pengaturan voltan yang dicapai adalah 4.07%, nilai pengaturan ini masih dibawah had yang dibolehkan. Secara umum penjana hasil pengubahsuaian ini adalah mudah dioperasikan dan dapat menyediakan bekalan elektrik dengan kos RM 0.91 per Watt. Oleh kerana itu penjana ini sangat sesuai untuk diaplikasi pada sistem tenaga diperbaharui terutama tenaga mikrohidro dan tenaga angin bersaiz kecil untuk kawasan yang belum dibekalkan grid nasional.

MODIFICATION OF SINGLE PHASE SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR USING SQUIRREL CAGE MOTOR

ABSTRACT

In this research, it was proposed to modify 750W commercial one-phase induction motor becomes a self-excited induction generator. Motor was functioned as a generator while it was rotated at above synchronous speed and excitation supply. In this modification, both motor windings stator, i.e. the auxiliary winding and the main winding, were electrically separated. Each winding serves as excitation winding and output terminal winding. Excitation capacitor was connected in shunt with support winding while other capacitors were connected in series with the load. Excitation capacitor values were determined based on reactance power, no load test and magnetization curve motor. Reactance power generator was measured when generator was operating as a motor. Magnetization curve was obtained by testing the motor without a load with varying voltage supply and synchronous speed test. Series capacitor was determined through experiments with various loads until the output voltage stability is achieved. To verify the generator, test was performed with various loads. The load test was pure load and general load with resistive and inductive. The experimental results with various type of loads showed that the generators have the ability to produce power of 607 W or 80.93% of the power rating and output voltage of 221V with frequency of 56.3 Hz at a speed of 1686 rpm. The achievable voltage regulation was about 4.07%, this regulation value is still below the permissible limit. Generally, this modified generator is easy to be used and can provide electricity supply by RM 0.91 per Watt. Therefore, this generator is very suitable to be applied on the renewable energy systems, especially microhydro power and small-sized wind energy for areas that was not national grid connected.

BAB I

PENGENALAN

1.0 Latarbelakang Permasalahan

Krisis tenaga yang terus berlanjutan terutama di negara membangun menyebabkan bekalan tenaga elektrik kepada pengguna menjadi terhad dan mahal, terutama di kawasan luar bandar. Malahan di kawasan yang dibekalkan tenaga, pengguna berusaha untuk menyediakan penjana elektrik sokongan untuk mengatasi masalah bekalan ketika bekalan daripada talian terputus. Situasi ini akan menjadi kritikal untuk bangunan yang penting seperti hospital, pejabat, sistem keselamatan, sistem komunikasi dan peralatan-peralatan kritikal lainnya. Penjana elektrik sokongan yang biasa digunakan oleh pengguna di kawasan luar bandar adalah penjana mudah alih yang digerakkan oleh mesin petrol. Penjana ini bekerja berdasarkan diod berputar [Murthy,1993]. Voltan keluaran daripada penjana mudah alih ini menunjukkan bentuk gelombang sinus yang tidak sempurna dengan kandungan harmonik yang tinggi sehingga penjana ini selalunya digunakan terhad kepada beban lampu sahaja. Harga minyak yang tidak stabil dan mahal serta masalah pengagihan ke kawasan pendalaman juga menjadi satu masalah bagi pengguna elektrik. Untuk mengatasi masalah ini, masyarakat pendalaman dapat memanfaatkan tenaga diperbaharui yang tersedia di kawasan luar bandar.

Beberapa sumber tenaga diperbaharui dan sumber tenaga alternatif yang dijadikan Tuhan pencipta alam semesta, dapat diubah menjadi kuasa elektrik dan dapat dimanfaatkan langsung oleh masyarakat, contohnya tenaga matahari, angin dan air. Namun tenaga matahari belum pasti dapat dimanfaatkan secara meluas di negara membangun, berdasarkan harga peralatannya yang masih mahal.

Seperti juga matahari, tenaga angin bergantung kepada kedudukan geografi dan masa. Bagaimanapun tiupan angin sukar untuk diramal dibandingkan dengan matahari. Kelajuannya boleh berubah dari masa ke semasa. Mungkin pada suatu keadaan iaitu kelajuan angin tidak cukup kuat untuk menggerakkan satu penjana, sedangkan matahari akan terbit

setiap pagi untuk mengeluarkan tenaga elektrik walaupun dalam keadaan cuaca mendung. Terdapat kawasan-kawasan kelajuan angin yang bertiup adalah kuat dan dalam masa yang lebih lama. Dalam hal ini penggunaan penjana elektrik tenaga angin di kawasan tersebut adalah praktikal. Malahan, penjana elektrik tenaga angin mempunyai kemampuan untuk menyediakan kuasa pada waktu siang dan malam [Emanuel,1985]. Masyarakat yang tinggal di kawasan yang berhampiran dengan sungai ataupun tasik juga dapat memanfaatkan sumber tenaga air untuk penjana tenaga elektrik bersaiz kecil yang biasanya dikenali sebagai tenaga mikrohidro.

Dalam sistem penjanaan elektrik tenaga angin dan tenaga mikrohidro yang wujud pada masa sekarang, beberapa penjana yang boleh dan telah digunakan adalah penjana aruhan, penjana segerak dan penjana magnet kekal. Penjana tersebut mempunyai kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Penjana magnet kekal tidak memerlukan arus ujaan, dapat digerakkan secara langsung tanpa memerlukan roda gigi dan mempunyai kecekapan yang tinggi. Bagi penjana magnet kekal bersaiz kecil ia mudah didapati di pasaran, tetapi harganya masih terlalu mahal, sehingga tidak memungkinkan untuk dipraktikkan di negara yang sedang membangun [Dubois,2000].

Disebabkan ciri angin yang berubah-ubah kelajuannya dari masa ke semasa, penjana aruhan adalah sesuai untuk dipraktikkan pada sistem tenaga angin, yang mana tenaga angin dapat diubah menjadi kuasa elektrik dalam julat kelajuan yang lebih besar. Penjana tak segerak memberikan banyak kelebihan-kelebihan berbanding penjana segerak. Ianya lebih mudah disambungkan, binaan yang kuat dan murah, kekerapan penyelenggaraan yang kurang, kawalan yang sederhana, dan saiz yang lebih kecil berbanding dengan penjana segerak untuk menjana kuasa per kW serta mempunyai kebolehlenturan kelajuan. Mesin aruhan boleh berfungsi sebagai motor mahupun penjana, maka ia boleh beroperasi pada kelajuan yang berubah-ubah. Kos yang diperlukan untuk merekabentuk penjana aruhan adalah lebih murah berbanding penjana lain. Perbezaan di atas menyebabkan penjana aruhan sangat sesuai untuk digunakan pada sistem tenaga diperbaharui, khususnya sistem tenaga angin dan sistem tenaga mikrohidro.

Secara praktik, di rumah-rumah kediaman dan di kawasan luar bandar umumnya dibekalkan dengan kuasa elektrik arus ulang alik (aua) satu-fasa. Kebanyakan perkakas dan mesin pertanian yang digerakkan kuasa elektrik adalah menggunakan bekalan satu-fasa. Mesin basuh, peti sejuk dan pendingin udara, pengering, kipas angin, pam, mesin jahit, pembersih vakum, jam, alat pertukangan tangan dan lain-lain juga menggunakan bekalan satu-fasa. Oleh kerana itu, perlu dirancang satu penjana elektrik yang murah dan mudah yang dapat diaplikasi pada sistem tenaga diperbaharui oleh masyarakat di kawasan pendalaman.

1.1 Objektif dan Skop Penyelidikan

Tujuan utama penyelidikan ini adalah mengubahsuai motor aruhan satu-fasa menjadi penjana elektrik ujaan sendiri. Motor aruhan satu-fasa yang digunakan adalah jenis rotor sangkar-tupai, 0.75kW, 4 kutub, 230V, 5A, 1340 rpm, 50 Hz.

Penyelidikan ini terhad kepada pengubahsuaian motor aruhan satu-fasa menjadi penjana aruhan ujaan sendiri. Ujian penjana hasil ubahsuai daripada motor aruhan hanya dilakukan di makmal dengan menggunakan motor arus terus (at) sebagai penggerak. Ujian dilakukan dalam keadaan berbeban dan tidak berbeban. Beban yang digunakan dalam ujian ini adalah beban berintangan tulin, beban beraruhan tulin, dan jenis beban umum dengan berbagai faktor kuasa.

1.2 Metodologi Penyelidikan

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penyelidikan ini dijelaskan sebagai berikut;

A. Kajian ilmiah

Melalui kajian ilmiah, matlumat yang akan diperolehi adalah mengenai prinsip operasi, parameter-parameter, model litar, ciri serta prestasi daripada penjana aruhan satu-fasa ujaan sendiri.

B. Rekabentuk

Untuk mengubahsuai motor aruhan satu-fasa menjadi penjana aruhan ujaan sendiri, beberapa langkah perlu dilakukan. Pertama, memisahkan dua belitan pemegun, iaitu belitan utama dan belitan sokongan yang tersambung selari. Seterusnya menentukan pemuat ujaan dan pemuat siri. Kuasa regangan yang diserap motor dijadikan sebagai dasar untuk menentukan nilai pemuat ujaan yang optimum.

C. Ujian beban

Penjana aruhan satu-fasa ujaan sendiri diuji dengan pelbagai beban yang bersifat berintang dan beraruhan. Motor arus terus digunakan untuk menggerakkan penjana pada kelajuan melebihi kelajuan segerak untuk mendapatkan data-data keluaran bagi menentukan prestasi penjana.

E. Analisis dan perbincangan hasil ujian

Data keluaran hasil ujian dianalisis dengan menggunakan beberapa persamaan untuk dibandingkan dengan hasil yang diperolehi dari pengiraan.

1.3 Tinjauan Tesis

Keseluruhan tesis ini dibahagikan kepada enam Bab yang merangkumi penerangan umum, teori, komponen, ubahsuai, hasil ujian serta perbincangan dan saranan.

Bab 1 memberikan penerangan secara umum yang berkaitan dengan tajuk tesis, iaitu latarbelakang permasalahan, objektif, skop dan metodologi projek.

Bab 2 membincangkan tentang asas dan teori berkaitan dengan penjana aruhan satu-fasa ujaan sendiri, yang meliputi prinsip dasar, serta ujian-ujian yang berkaitan dengan penentuan parameter penjana.

Bab 3 menjelaskan hal ubahsuai penjana aruhan satu-fasa ujaan sendiri. Ubahsuai bermula daripada menentukan pemuat pirau sampai kepada penentuan komponen pemuat siri. Ujian beban juga dijelaskan dalam Bab 3 ini.

Bab 4 membincangkan hasil ujian penjana dengan pelbagai beban yang bersifat berintangan dan beraruhan, baik beban tulin mahupun beban umum.

Bab 5 memberikan kesimpulan daripada proses ubahsuai motor menjadi penjana aruhan. Beberapa cadangan berkaitan projek yang telah dijalankan diberikan bagi membolehkan kesinambungan projek ini.

BAB II

PENJANA ARUHAN SATU-FASA UJAAAN SENDIRI

2.0 Pengenalan

Penjana aruhan pada dasarnya adalah motor aruhan yang diubahsuai menjadi penjana menerusi teknik tertentu. Penjana aruhan mempunyai binaan yang sama dengan motor aruhan [Boldea dan Nasar, 2001]. Perbezaan yang penting antara penjana aruhan dengan motor aruhan; iaitu kelajuan pemutar digerakkan dengan kelajuan yang lebih terhadap putaran medan magnet pemegun. Dalam bentuk kuantitatif, jika n_s adalah kelajuan segerak mekanik (rpm) pada frekuensi segerak $f_s(Hz)$, jumlah kuasa keluaran yang berasal dari voltan aruhan, berkadar kepada perbezaan kelajuan nisbi antara putaran segerak elektrik dan putaran mekanik, hal ini dapat dijelaskan dalam julat faktor gelincir kelajuan seperti dinyatakan berikut,

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.1)$$

disini s adalah faktor gelincir dan n_r adalah kelajuan pemutar (rpm).

Jika frekuensi pemegun adalah f_s , maka frekuensi pemutar f_r dapat dihubungkan dengan frekuensi bekalan (pemegun) melalui hubungan berikut,

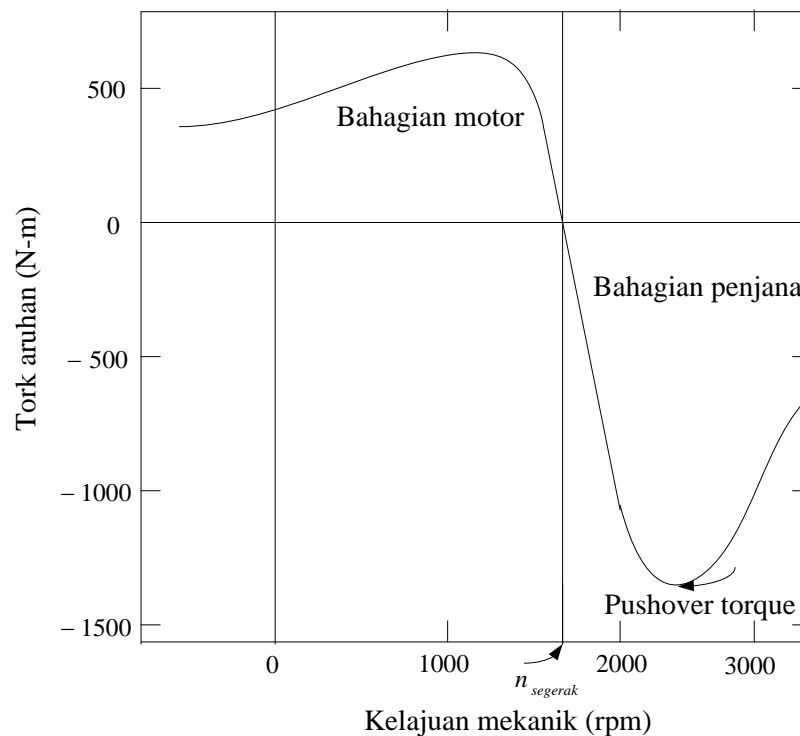
$$f_r = \frac{p}{120} (n_s - n_r) \frac{n_s}{n_r} = s f_s \quad (2.2)$$

Ketika tidak ada pergerakan nisbi daripada putaran antara pemutar dan pemegun $\omega_r = \omega_s$, maka frekuensi pemutar adalah kosong. Untuk kelajuan sudut, dalam bentuk kuantitatif, voltan aruhan pada pemutar secara langsung berkadar kepada faktor gelincir s , dan dari pemutar diaruhkan ke belitan pemegun. Dari pentakrifan ini, voltan aruhan E_r pada pemutar teraruh untuk sedikit kelajuan lebih terhadap voltan pemutar terkunci E_{r0} , iaitu,

$$E_2 = E_r = s E_{r0} \quad (2.3)$$

Rajah 2.1 menjelaskan ciri kelajuan-tork untuk mesin aruhan . Ia menunjukkan secara jelas bahawa jika motor aruhan digerakkan oleh penggerak mula pada kelajuan yang lebih besar dari kelajuan segerak, maka arah tork aruhan akan berlawanan dan ia akan berkelakuan sebagai penjana. Jika tork pada aci bertambah, maka kuasa yang dijanakan juga bertambah. Bagaimanapun, ada tork aruhan maksimum operasi penjana. Tork ini disebut *tork tolak lebih*. Jika tork yang sebenarnya lebih besar daripada tork tolak lebih, mesin akan bergerak dengan kelajuan melampau.

Mesin aruhan yang beroperasi sebagai penjana adalah terhad. Berbeza dengan penjana segerak, ia tidak dapat menghasilkan kuasa regangan kerana ia tidak mempunyai litar medan yang terpisah. Pada hakikatnya, ia memerlukan kuasa regangan.



Rajah 2.1 Ciri kelajuan-tork mesin aruhan

Bekalan luar daripada kuasa regangan mesti disediakan secara berterusan untuk mengekalkan medan magnet pada belitan pemegun. Penjana aruhan tidak dapat mengawal voltan keluaran sendiri, kerana ia tidak mempunyai litar medan. Voltan pangkalan penjana harus dikekalkan oleh kuasa yang disambungkan kepadanya.

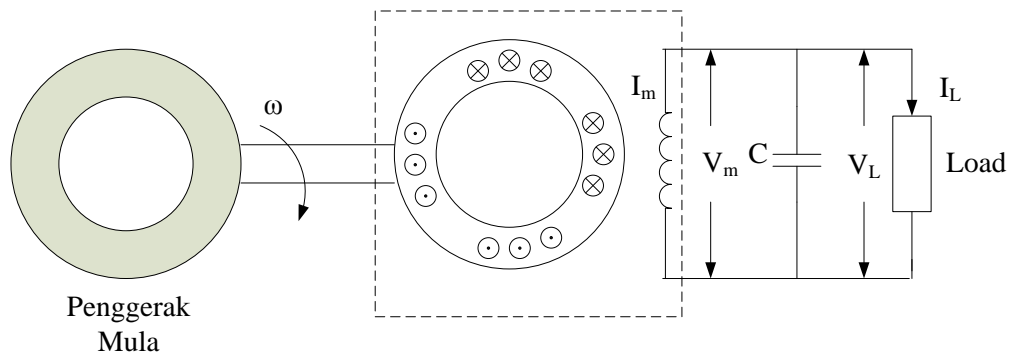
Kelebihan utama daripada penjana aruhan adalah ianya mempunyai binaan yang sederhana dan berkebolehan untuk dioperasikan pada kelajuan yang berbeza (melebihi kelajuan segerak). Pengaturan penjana aruhan adalah sederhana, sehingga ia sesuai untuk diaplikasi pada tenaga diperbaharui dan juga pada penggerak mudah alih sebagai bekalan kuasa tambahan terutama pada masyarakat luar bandar. Pada aplikasi ini, pembetulan faktor kuasa dapat disediakan oleh pemuat dan voltan pangkalan dapat dikawal oleh grid lokal [Kiamah, 2003].

2.1 Penjana aruhan satu-fasa

Penjana aruhan merupakan hasil ubahsuai daripada motor aruhan. Motor aruhan terdiri dari motor aruhan satu fasa dan tiga fasa. Motor aruhan satu fasa pula terdiri daripada motor aruhan satu fasa satu belitan dan motor aruhan satu fasa dua belitan. Dalam sub bab berikut akan dijelaskan kedua jenis penjana aruhan, iaitu penjana aruhan satu fasa satu belitan dan penjana aruhan satu fasa dua belitan.

2.1.1 Penjana aruhan satu-belitan

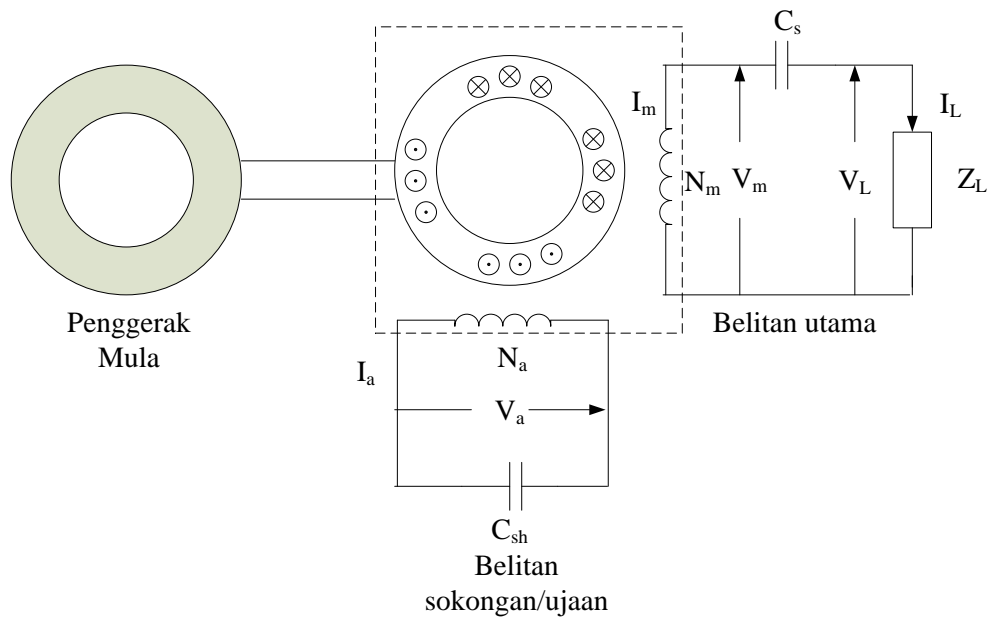
Ketika pemuat yang sesuai disambungkan pada pangkalan belitan pemegun, voltan aruhan yang disebabkan oleh ujaan sendiri, magnitudnya bergantung kepada nilai pemuat dan kelajuan serta ciri pemagnetan [Murthy,1992]. Ketepuan magnet membatasi penaikan voltan yang berterusan dan tetap pada nilai keadaan mantap. Ketika belitan pemegun dibebankan, nilai jatuh voltan bergantung kepada magnitud dan faktor kuasa beban. Rajah 2.2 menunjukkan sambungan skema tersebut. Mesin digerakkan pada kelajuan melebihi kelajuan segerak ω , maka arus I_m yang dibekalkan merupakan jumlah arus ujaan I_C dan arus beban I_L . Pengukuran ciri beban menunjukkan bahawa sebahagian besar jatuh voltan (voltage drop) terjadi pada beban dengan faktor kuasa lebih kecil daripada satu.



Rajah 2.2 Litar penjana satu-fasa satu belitan

2.1.2 Penjana aruhan dua-belitan

Penjana aruhan satu-fasa ujaan sendiri adalah penjana yang diubahsuai daripada motor aruhan dengan dua-belitan pemegun. Belitan tersebut adalah belitan utama dan belitan sokongan. Satu belitan pemegun berfungsi sebagai belitan ujaan dan belitan yang lain berfungsi sebagai belitan beban.



Rajah 2.3 Litar penjana satu-fasa dua belitan

Sewaktu penjana aruhan digerakkan oleh penggerak mula untuk kelajuan melebihi kelajuan segerak ω , voltan diaruhkan pada pangkalan belitan utama dan belitan sokongan. Hal ini berlaku oleh sebab proses ujaan sendiri oleh pemuat ujaan C_{sh} . Apabila penjana

diberi beban, nilai voltan aruhan akan turun, ini disebabkan oleh kejatuhan voltan pada galangan beban dan penyahmagnetan. Masalah ini telah diatasi dengan menyambung satu pemuat siri C_s yang sesuai yang dapat mengurangi penyahmagnetan oleh beban. Rajah 2.3 menunjukkan litar penjana aruhan satu fasa dua belitan.

2.2 Pemuat ujaan sendiri C_{sh}

Pemuat ujaan-sendiri pada mesin aruhan dikenal sangat fenomena [Murthy,1992]. Ketika penjana digerakkan oleh penggerak mula, fluks baki dalam pemutar mengaruhkan sedikit voltan ke dalam belitan pemegun. Jika satu pemuat yang sesuai disambungkan kepada pangkalan belitan pemegun, maka arus akan mengalir mendahului voltan. Ini akan menambah fluk teras dan menimbulkan kesan salji runtuh yang disebabkan adanya perbezaan voltan, iaitu perbezaan antara voltan aruhan dengan voltan pemuat. Kenaikan voltan terus-menerus ditahan oleh ketepuan magnet pada mesin, sehingga keadaan mantap dapat dicapai. Voltan keadaan mantap bergantung kepada kelajuan, kemuatan, parameter mesin, ciri pemagnetan dan beban. Dengan kata lain, fenomena ujaan sendiri disebabkan oleh pertukaran tenaga berterusan antara medan elektrik (pemuat) dan medan magnet (mesin).

Untuk mendapatkan satu nilai pemuat ujaan yang sesuai, beberapa teknik boleh dilakukan. Cara pertama adalah dengan pendekatan cuba-ralat. Cara ini dilakukan dengan merubah-ubah nilai pemuat sampai didapat satu nilai yang sesuai. Cara kedua dapat dilakukan dengan mengukur kuasa regangan motor. Kuasa regangan motor dapat dijadikan asas untuk menentukan nilai pemuat ujaan. Cara lain adalah melalui lengkung pemagnetan yang diperolehi dari ujian tanpa beban dan ujian kelajuan segerak. Persamaan litar setara penjana juga dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan nilai pemuat ujaan tersebut. Hal ini akan dijelaskan dalam bahagian berikut.

2.3 Penentuan nilai pemuat ujaan sendiri C_{sh}

Penentuan nilai pemuat ujaan sendiri C_{sh} dapat dilakukan dengan beberapa cara, seperti dijelaskan berikut ini.

2.3.1 Penentuan pemuat ujaan melalui nilai kuasa regangan motor

Dalam penyelidikan ini, penentuan pemuat ujaan akan dilakukan dengan pendekatan praktikal, iaitu dengan mengukur kuasa regangan yang diserap oleh mesin pada waktu difungsikan sebagai motor. Penentuan dengan cara ini dianggap lebih mudah dan menghasilkan nilai yang sesuai.

Ketika mesin berfungsi sebagai motor, selain menyerap kuasa aktif, mesin juga menyerap kuasa regangan. Campuran kuasa ini disebut kuasa ketara. Kuasa regangan yang diserap motor disebabkan adanya komponen kearuhan dalam motor, iaitu belitan pemegun. Ketika mesin beroperasi sebagai penjana, maka kuasa regangan dapat diperolehi dari komponen berkemuatan [Griffiths,1995].

Kuasa ketara S yang diserap oleh motor adalah sebagai berikut,

$$S = VI \quad (2.4)$$

Disini,

V adalah voltan

I adalah arus.

Sementara kuasa aktif P yang diserap oleh motor adalah,

$$P = S \cos \theta \quad (2.5)$$

Disini,

$\cos \theta$ adalah faktor kuasa.

Seterusnya kuasa regangan Q yang diserap motor dijelaskan sebagai berikut,

$$Q = S \sin \theta \quad (2.6)$$

atau

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.7)$$

Ketika mesin dioperasikan sebagai penjana, maka pemuat harus membekalkan paling sedikit Q VAR kepada beban. Arus berkemuatan yang dihasilkan oleh pemuat adalah,

$$I_c = \frac{Q}{V} \quad (2.8)$$

Regangan berkemuatan X_c adalah,

$$X_c = \frac{V}{I_c} \quad (2.9)$$

Dengan nilai regangan berkemuatan, maka dapat ditentukan nilai daripada pemuat ujaan yang diperlukan untuk membekalkan kuasa regangan yang diperlukan oleh penjana. Nilai pemuat C dapat dijelaskan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (2.10)$$

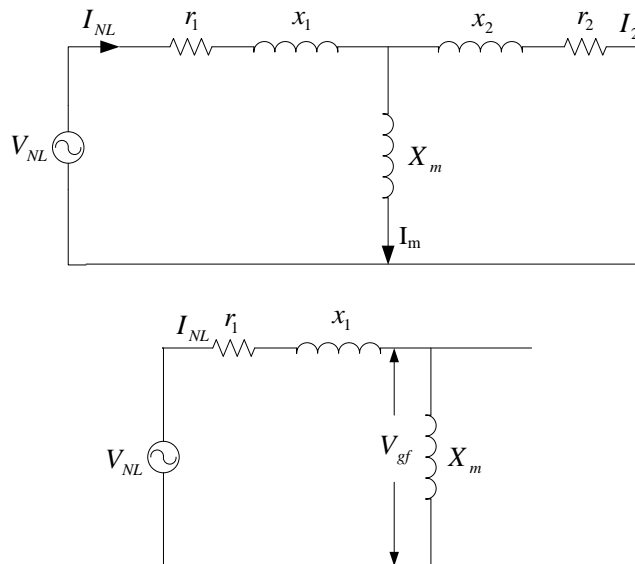
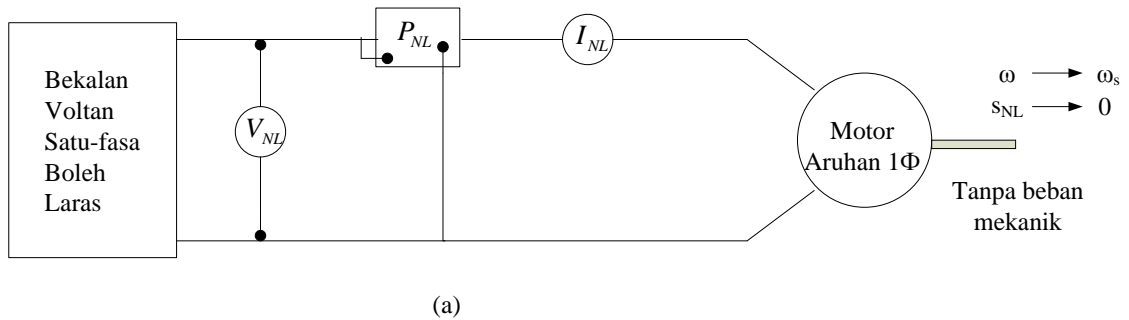
di sini f adalah frekuensi sistem.

2.3.2 Penentuan pemuat ujaan melalui lengkung pemagnetan

Untuk menemui lengkung pemagnetan daripada penjana aruhan, boleh diperolehi dengan dua cara. Cara pertama adalah dengan melakukan ujian tanpa beban dengan voltan bekalan diubah. Cara kedua adalah dengan melakukan ujian kelajuan segerak. Dari lengkung pemagnetan diperolehi nilai regangan pemagnetan yang merupakan cerun daripada lengkung tersebut. Pemuat ujaan juga dapat ditentukan melalui lengkung pemagnetan ini. Lengkung pemagnetan ditentukan melalui ujian penjana tanpa beban dan voltan berubah. Ujian penjana kelajuan segerak dapat dijelaskan sebagai berikut.

2.3.2(a) Ujian tanpa beban voltan berubah

Penjana dioperasikan sebagai motor tanpa beban mekanik pada aci dengan bekalan voltan yang berubah-ubah pada frekuensi kadaran. Data daripada voltan masukan dan arus diambil pada setiap perubahan nilai voltan. Rajah 2.4 menunjukkan litar ujian tanpa beban dan voltan bekalan berubah.



Rajah 2.4 Litar Ujian tanpa beban voltan masukan berubah

(a) Litar ujian. (b) Model litar

Gelincir adalah sangat kecil pada keadaan tanpa beban sehingga $r_2 / 2s$ bernilai sangat besar dan litar pemutar dapat dianggap dalam keadaan terbuka, dimana r_2 adalah nilai rintangan pemutar. Jika nilai regangan pemagnetan X_m berubah, ianya harus dihilangkan dari persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai voltan celah udara V_{gf} .

Kuasa dua daripada galangan input diberikan oleh persamaan berikut,

$$\frac{V_{gf}^2}{I_{NL}^2} = r_1^2 + (x_1 + X_m)^2 \quad (2.11)$$

Disini,

V_{gf} adalah voltan celah udara

I_{NL} adalah arus tanpa beban

r_1 adalah rintangan belitan pemegun

x_1 adalah regangan bocor pemegun

X_m adalah regangan pemagnetan.

seterusnya,

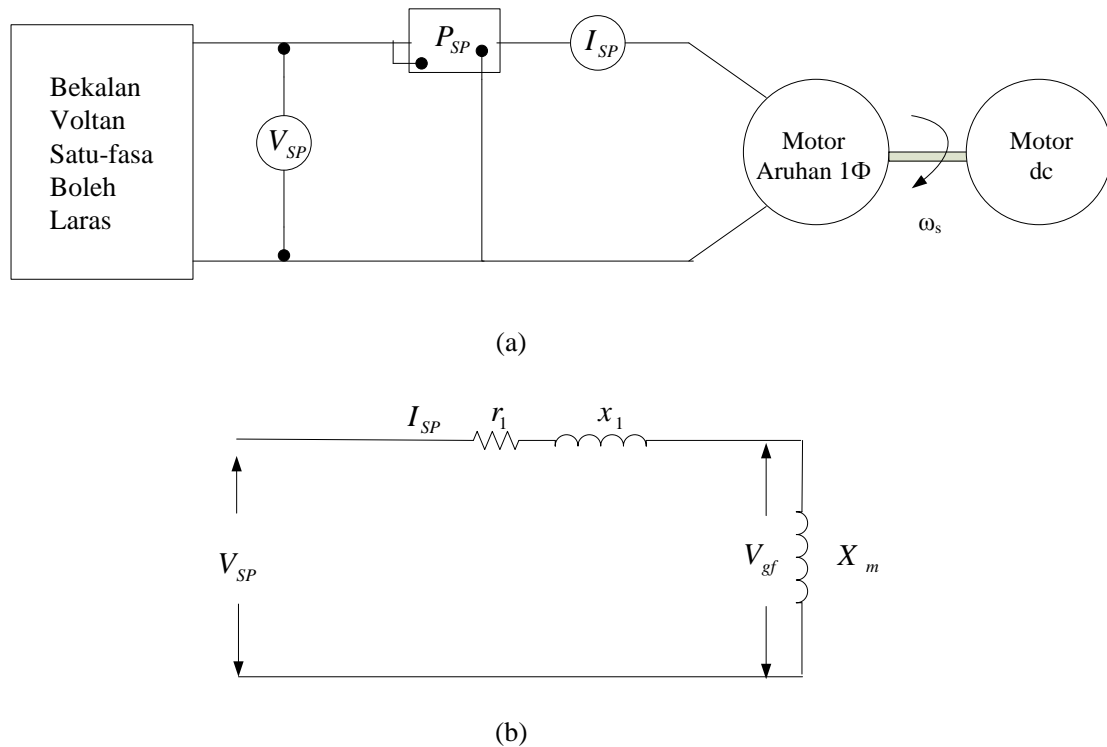
$$X_m = \left(\frac{V_{gf}^2}{I_{NL}^2} - r_1^2 \right)^{\frac{1}{2}} - x_1$$

Hasil yang diperolehi ialah,

$$|V_{gf}| = X_m I_{NL} = \left[\left(\frac{V_{gf}^2}{I_{NL}^2} - r_1^2 \right)^{\frac{1}{2}} - x_1 \right] I_{NL} \quad (2.12)$$

2.3.2(b) Ujian kelajuan segerak

Ujian kelajuan segerak dilakukan dengan menggerakkan pemutar pada kelajuan segerak pada frekuensi dasar [Rai,193]. Ujian ini dilakukan untuk mendapatkan lengkung pemagnetan daripada penjana.



Rajah 2.5 Litar ujian kelajuan segerak. (a) Litar ujian. (b) Litar setara

Dari lengkung pemagnetan, maka diperolehi nilai regangan pemagnetan daripada belitan pemegun penjana. Ia dapat digerakkan dengan menggunakan motor dc atau motor lain. Voltan bekalan diubah pada pangkalan belitan pemegun dan arus serta kuasa direkod pada setiap perubahan voltan. Pada setiap perubahan voltan kelajuan pemutar dikekalkan pada kelajuan segerak. Pada kelajuan lebih kecil daripada kelajuan segerak, rintangan pemutar r_2 dan regangan bocor pemutar x_2 adalah sangat kecil berbanding dengan $r_2 / 2s$, sehingga litar pemutar dapat dianggap dalam keadaan terbuka.

Rajah 2.5 menunjukkan litar penjana pada kelajuan lebih kecil daripada kelajuan segerak, iaitu pada frekuensi per unit $F = 1$ atau pada gelincir $s = 0$, dan litar pemutar dianggap terbuka. Galangan masukan Z_{in} adalah,

$$Z_{in} = r_1 + jx_1 + jX_m \quad (2.13)$$

Lengkungan voltan celah udara V_{gf} terhadap arus pemagnetan I_m , iaitu V_{gf} vs I_m menghasilkan regangan pemagnetan X_m .

2.4 Penentuan pemuat ujaan melalui persamaan daya gerak magnet

Pemuat ujaan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan daya gerak magnet aruhan antara belitan utama dan belitan sokongan [Jin., et.al, 2005]. Ketika penjana digerakkan oleh penggerak mula, fluks baki dalam pemutar mengaruhkan sedikit voltan ke dalam belitan pemegun yang terdiri daripada belitan utama dan belitan sokongan. Voltan aruhan ini menghasilkan arus yang kecil dalam belitan.

Arus akan menghasilkan daya gerak magnet dalam masing-masing belitan. Arus belitan utama dan belitan sokongan dapat dipisahkan sebagai berikut,

$$i_m = \sqrt{2}I_m \cos \omega t \quad (2.14)$$

$$i_a = \sqrt{2}I_a \cos(\omega t + \theta_a) \quad (2.15)$$

Disini,

i_m adalah arus belitan utama

i_a adalah arus belitan sokongan.

Keseluruhan daya gerak magnet teraruh F (MMF) adalah,

$$F(\theta, t) = F_m(\theta, t) + F_a(\theta, t) \quad (2.16)$$

Disini,

F_m adalah daya gerak magnet teraruh belitan utama

F_a adalah daya gerak magnet teraruh belitan sokongan.

Daya gerak magnet daripada belitan utama dan belitan sokongan dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$F_m(\theta, t) = N_m i_m \cos \theta = N_m \sqrt{2}I_m \cos \omega t \cos \theta \quad (2.17)$$

$$F_a(\theta, t) = N_a i_a \cos(\theta + 90^\circ) = N_a \sqrt{2}I_a \cos(\omega t + \theta_a) \cos(\theta + 90^\circ) \quad (2.18)$$

Maka daya gerak magnet keseluruhan yang diperolehi adalah,

$$F(\theta, t) = N_m \sqrt{2}I_m \cos \omega t \cos \theta + N_a \sqrt{2}I_a \cos(\omega t + \theta_a) \cos(\theta + 90^\circ) \quad (2.19)$$

Disini,

N_m adalah jumlah belitan utama

N_a adalah jumlah belitan sokongan

θ_a adalah perbezaan fasa antara belitan utama dan belitan sokongan.

Persamaan 2.19 di atas dapat dibahagi menjadi daya gerak magnet teraruh, iaitu daya gerak magnet ke hadapan dan daya gerak magnet ke belakang. Hal ini dijelaskan oleh hubungan berikut ini,

$$F(\theta, t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [(N_m I_m - N_a I_a \sin \theta_a) \cos(\omega t + \theta) - (N_a I_a \cos \theta_a) \sin(\omega t + \theta)] \\ + \frac{1}{\sqrt{2}} [(N_m I_m + N_a I_a \sin \theta_a) \cos(\omega t - \theta) + (N_a I_a \cos \theta_a) \sin(\omega t - \theta)] \quad (2.20)$$

Dalam Persamaan 2.20, bahagian pertama daripada sisi kanan persamaan adalah daya gerak magnet ke hadapan dan bahagian kedua adalah daya gerak magnet ke belakang. Jika

$$N_m I_m = N_a I_a, \theta_a = 90^\circ$$

maka persamaan 2.20 akan menjadi kosong, dan persamaan di atas menjadi lebih ringkas.

Ianya hanya sebagai persamaan daya gerak magnet ke hadapan seperti berikut,

$$F(\theta, t) = N_m \sqrt{2} I_m \cos(\omega t - \theta)$$

Nilai optimum daripada pemuat ujaan C_{sh} dapat ditentukan dalam keadaan,

$$N_m I_m = N_a I_a, \theta_a = 90^\circ.$$

Sehingga,

$$N_m I_m = N_a I_a$$

boleh dijelaskan sebagai galangan dan seterusnya Persamaan 2.20 dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$N_m I_m = N_a I_a \\ N_m \sqrt{r_{lm}^2 + (\omega L_m)^2} = N_a \sqrt{r_{lm}^2 + (\omega L_a - \frac{1}{\omega C_{sh}})^2} \quad (2.21)$$

Nilai C_{sh} daripada Persamaan 2.21, yang dirumuskan sebagai berikut;

$$C_{sh} = \frac{1}{\omega \left\{ r_{1m} + \omega L_a - \left(\frac{N_a}{N_m} \right) \left(r_{1m} + \omega L_m - \sqrt{2r_{1m}\omega L_m} \right) \right\}} \quad (2.22)$$

Disini,

r_{1m} adalah rintangan belitan pemegun utama

L_m adalah pearuh belitan pemegun utama

L_a adalah pearuh belitan pemegun sokongan

2.5 Pemuat siri C_s

Menurut kajian Jin et. al (2005), menyatakan bahawa pemuat C_s secara siri disambungkan kepada belitan utama daripada penjana aruhan untuk menghilangkan unsur tidak stabil yang bergantung kepada perubahan beban. Ini kerana litar daripada belitan utama dibuka pada keadaan tidak berbeban, maka menganalisis litar dalam keadaan ini tidak mungkin dapat dilakukan. Walau bagaimanapun, pemuat siri C_s harus ditentukan pada keadaan berbeban. Pemuat siri C_s dapat dikira dari persamaan yang digunakan dalam menentukan pemuat ujaan C_{sh} dan beban R_L . Secara am nya dapat dirumuskan sebagai berikut,

$$N_m \sqrt{(r_{1m} + R_L)^2 + \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_s} \right)^2} = N_a \sqrt{r_{1a}^2 + \left(\omega L_a - \frac{1}{\omega C_{sh}} \right)^2} \quad (2.23)$$

$$C_s = \frac{1}{\omega \left\{ r_{1m} + R_L + \omega L_m - \left(\frac{N_a}{N_m} \right) \left(r_{1a} + \omega L_a - \frac{1}{\omega C_{sh}} \right) \right\}} \quad (2.24)$$

Disini,

r_{1a} adalah rintangan belitan pemegun sokongan

2.6 Kesan perubahan frekuensi

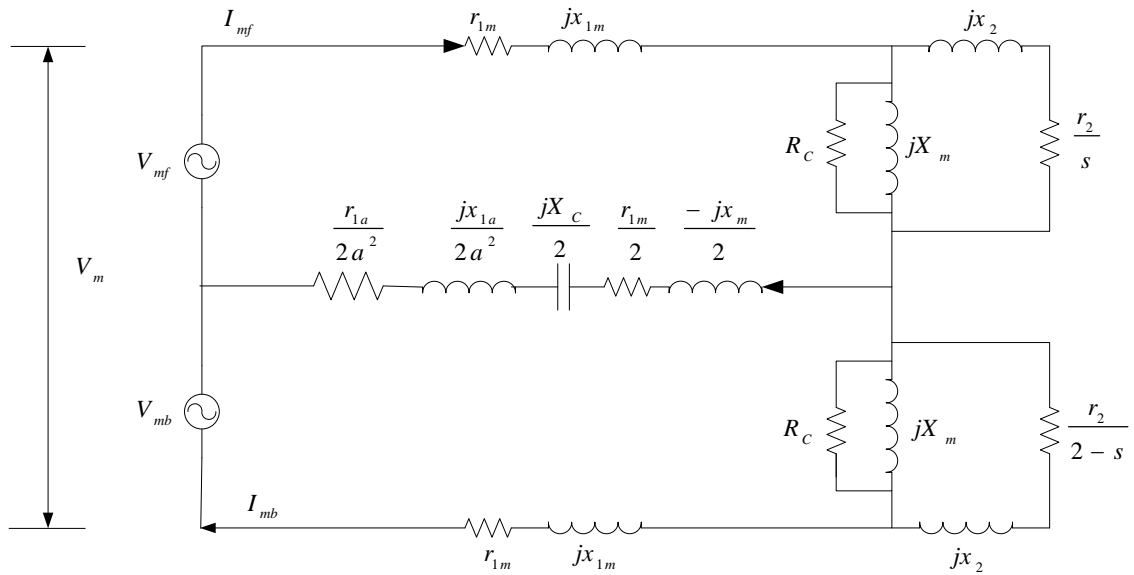
Model litar setara daripada motor aruhan satu-fasa dua-belitan yang merujuk ke pemegun pada frekuensi kadaran ditunjukkan di dalam Rajah 2.6. Frekuensi kadaran daripada motor ditandai dengan f_B yang bersesuaian dengan kelajuan segerak ω_B , maka perbandingan daripada kelajuan pemutar penjana ω berbanding kelajuan segerak dasar ω_B adalah W .

Maka hubungan berikut diperolehi,

$$W = \frac{\omega}{\omega_B} \quad (2.25)$$

Dengan cara yang sama, perbandingan daripada frekuensi terjana f terhadap frekuensi kadaran f_B dinyatakan sebagai F , iaitu,

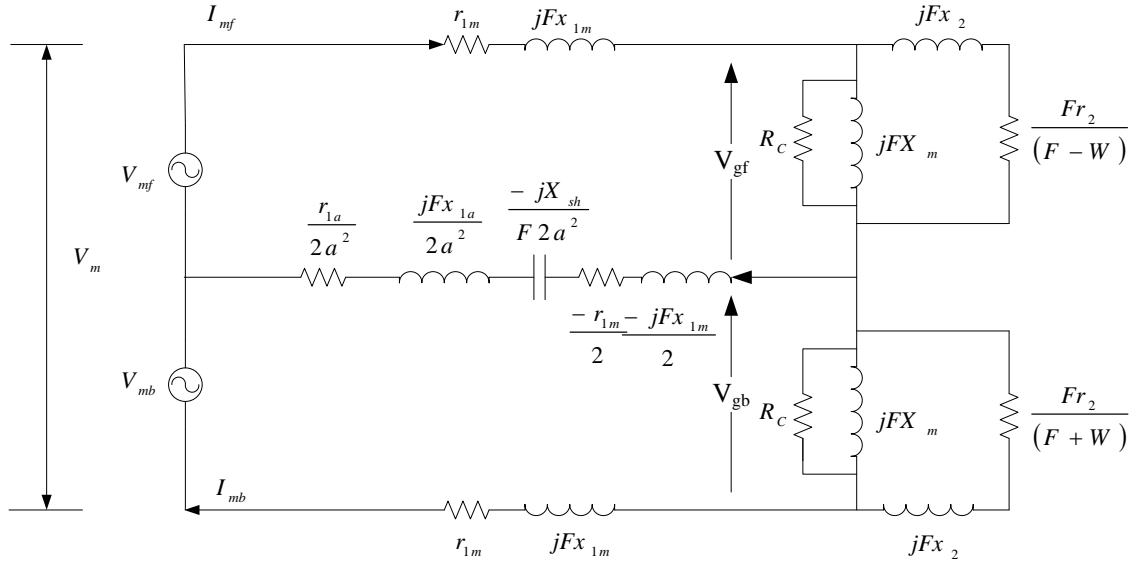
$$F = \frac{f}{f_B} \quad (2.26)$$



Rajah 2.6 Model motor aruhan satu-fasa dua-belitan pada frekuensi kadaran

Berdasarkan Rajah 2.6, semua model regangan diukur pada frekuensi kadaran dan di bawah keadaan frekuensi yang berubah. Nilai regangan beraruhan berkadaran terus dengan perubahan frekuensi dan nilai regangan berkemutan berkadaran songsang terhadap

perubahan frekuensi [McPherson dan Laramore, 1990] . Voltan teraruh terhadap $|V_{gf}|$ dan kebelakang $|V_{gb}|$ yang diaruhkan oleh fluks celah udara berkadaran terus dengan perubahan frekuensi tersebut. Kesan ini ditunjukkan oleh Rajah 2.7.



Rajah 2.7 Kesan perubahan frekuensi pada motor aruhan

Kelajuan segerak juga berubah terhadap perubahan frekuensi yang ditandai dengan $F\omega_B$. Gelincir s pada keadaan operasi adalah

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{F\omega_B - W\omega_B}{F\omega_B} = \frac{F - W}{F} \quad (2.27)$$

Diperhatikan juga bahawa bila gelincir bernilai negatif dalam operasi sebagai penjana, maka kuantiti $F - W$ juga bernilai negatif.

2.7 Hubungan frekuensi dengan gelincir

Merujuk kepada bahagian penjana daripada lengkung tork/gelincir seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 2.8, memperlihatkan bahawa gelincir menjadi kecil dan negatif. Beban elektrik tidak boleh dinaikkan melampaui tork maksimum. Pada titik ini, operasi

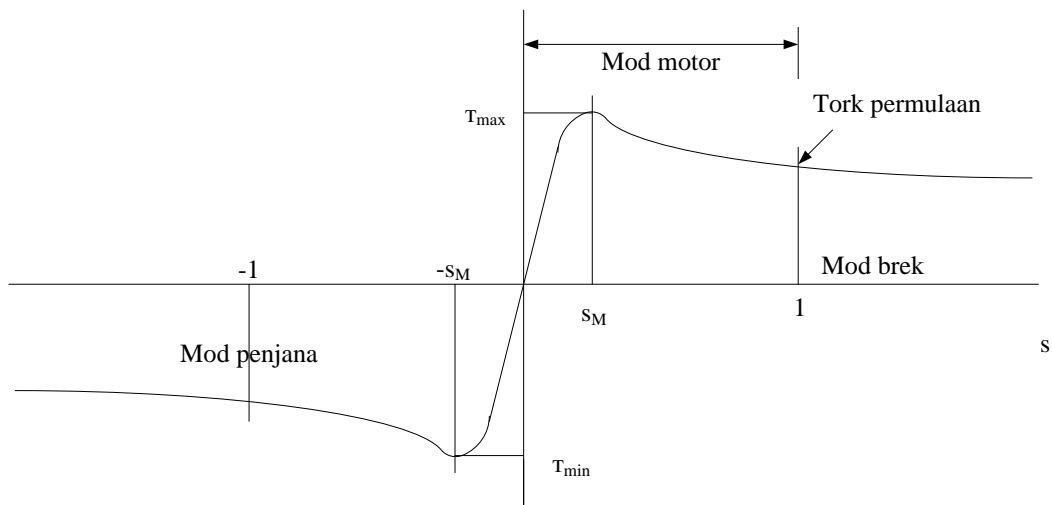
menjadi tidak stabil dan penjana tidak berfungsi. Frekuensi keluaran f diberikan oleh hubungan;

$$f = \frac{p\omega_s}{4\pi} = \frac{p}{4\pi} \frac{\omega}{1-s} \quad (2.28)$$

Disini,

p adalah kutub motor.

Dari persamaan 2.28 dapat dijelaskan bahawa faktor yang mempengaruhi nilai frekuensi penjana ditentukan oleh gelincir dan kelajuan penjana. Perubahan nilai gelincir menyebabkan perubahan nilai frekuensi. Apabila gelincir negatif, maka kuantiti $(1-s)$ melebihi satu. Jika beban elektrik ditambahkan kepada penjana, kelajuan penjana akan berkurang dan ini akan mempengaruhi nilai frekuensi penjana.



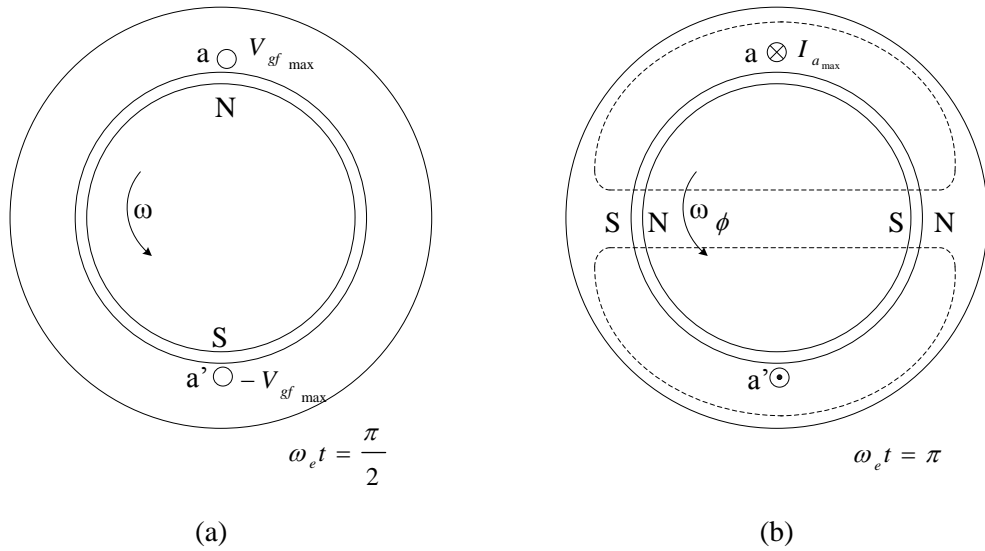
Rajah 2.8 Tork sebagai fungsi gelincir

2.8 Pembinaan voltan aruhan

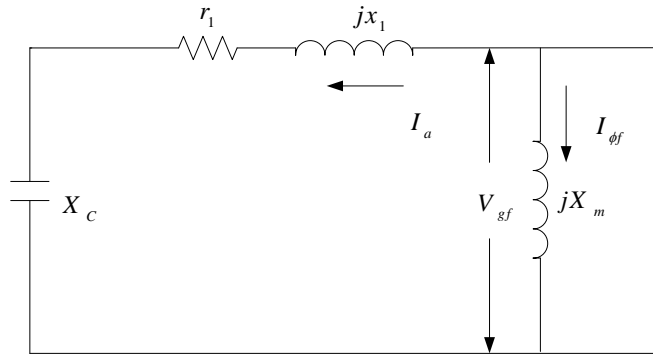
Untuk menghasilkan voltan pangkalan [McPherson dan Laramore ,1990], pada waktu penggerak mula menggerakkan penjana melebihi kelajuan segerak, ia harus meliputi dua syarat. Pertama, teras pemutar harus mempunyai sedikit kemagnetan baki dan nilai

pemuatan ujaan C_{sh} yang sesuai disambungkan ke pangkalan belitan pemegun. Teras pemutar tidak memerlukan pemagnetan yang tinggi. Selalunya, operasi penjana pada waktu sebelumnya menyisakan kemagnetan yang cukup pada pemutar. Apabila kemagnetan tidak ada pada pemutar, maka kemagnetan dapat diperolehi dengan cara memicu (trigger) bekalan voltan arus terus (at) pada pangkalan belitan ujaan [Anozira, 2002].

Dalam Rajah 2.9 menunjukkan bahawa mengapa voltan pada penjana harus mendahului. Kutub magnet N dan kutub magnet S yang terbina dalam pemutar disebabkan oleh adanya kemagnetan baki. Keadaan tidak berbeban dijelaskan untuk menghindari kerumitan yang tidak ketara. Pada waktu rintangan beban R tidak terhingga, maka nilai gelincir yang dihasilkan adalah sangat kecil, sehingga nilai $r_2 / (F - W)$ secara amnya sama dengan litar terbuka. Seterusnya arus kemagnetan $I_{\phi g} \approx -I_a$, seperti yang diperlihatkan di dalam Rajah 2.10.



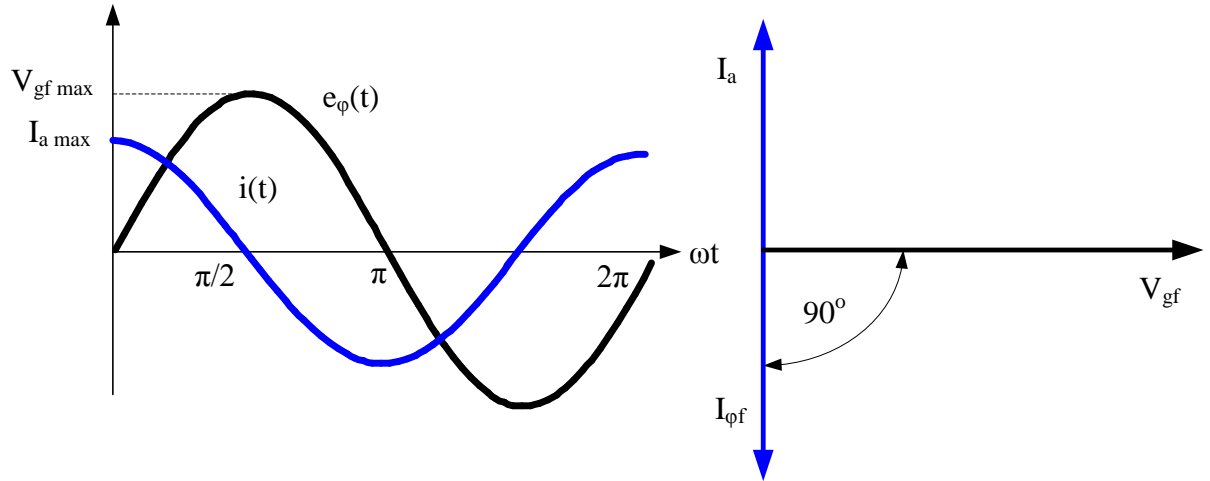
Rajah 2.9 Keadaan pembinaan voltan penjana aruhan terpencil



Rajah 2.10 Model litar penjana tanpa beban

Merujuk kepada Rajah 2.9a menunjukkan bahawa kutub magnet baki pada pemutar dengan kedudukan relatif terhadap belitan pemegun sedemikian, sehingga fluks penghubung dengan belitan tersebut berkurang pada kedudukan maksimum dan menyebabkan nilai voltan celah udara V_{gf} mencapai nilai puncak. Nilai puncak yang dihasilkan adalah bersesuaian dengan nilai kemagnetan baki pada pemutar. Rajah 2.9b memperlihatkan keadaan 90 darjah elektrik seterusnya. Kutub pemutar terbentang sepanjang paksi daripada belitan pemegun, dan pada waktu voltan mencapai nilai tertentu, maka arus belitan harus dalam arah yang dapat menaikkan nilai kemagnetan pemutar. Merujuk kembali kepada Rajah 2.9b, penggunaan kaedah tangan kanan menunjukkan bahawa I_a bernilai maksimum negatif.

Pemeriksaan daripada bentuk gelombang di dalam Rajah 2.11 memperlihatkan bahawa arus beban I_a mendahului V_{gf} dengan sudut 90 darjah. Hal ini diakibatkan oleh galangan yang dihubungkan ke pangkalan penjana adalah berkemuatan.



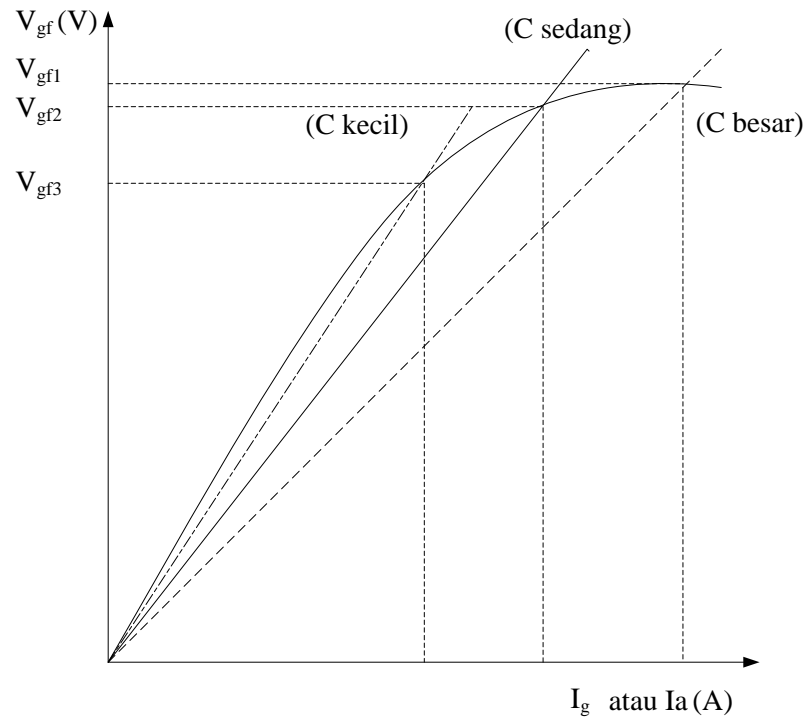
Rajah 2.11 Gelombang keluaran tanpa beban dan gambarajah pemfasa

Plot voltan celah udara $|V_{gf}|$ seperti yang digambarkan di dalam Rajah 2.12 adalah fungsi daripada arus belitan pemegun $|I_a|$ untuk sesuatu mesin aruhan satu-fasa. Bagaimanapun, ketepuan adalah diabaikan dalam pemuat. Pada keadaan tanpa beban, $|I_{\phi g}| = |I_a|$, dan jika r_1 dan x_1 bernilai kecil, maka $I_a \approx (V_{gf} - jX_C)$, sehingga ciri pemuat menjadi satu garis lurus ketika diplot pada grid yang sama dengan lengkung pemagnetan. Persamaan daripada garis lurus tersebut adalah,

$$|V_{gf}| = X_C |I_{\phi g}| \quad (2.29)$$

Perhatikan bahawa cerun daripada garis tersebut adalah X_C , iaitu kemuatan daripada pemuat ujaan. Kelengkungan dibuat untuk operasi pada frekuensi kadaran. Diperlihatkan bahawa untuk satu nilai regangan berkemuatan X_{C1} , voltan tanpa beban akan mencapai V_{gf1} , pada waktu penjana digerakkan pada kelajuan gelincir negatif. Kemuatan kritikal adalah bersesuaian dengan garis celah udara, dalam hal ini adalah C_1 . Untuk pemuat yang lebih kecil, voltan tidak akan terbina sama sekali. Ordinat daripada kelengkungan kemagnetan adalah berbanding lurus terhadap frekuensi dan cerun daripada garis X_C adalah

berkadaran songsang terhadap frekuensi. Sehingga jika kelajuan penjana berkurang, maka diperlukan pemuat yang lebih besar untuk menjaga voltan yang diinginkan.



Rajah 2.12 Lengkung pemagnetan penjana aruhan satu-fasa

2.9 Model keadaan mantap

Litar setara penjana aruhan satu-fasa ujaan sendiri merupakan hasil ubahsuai daripada litar setara motor aruhan dua belitan berdasarkan tiori *double rotating field* [Singh dan Shilpkar, 1999]. Litar setara motor aruhan satu-fasa dua-belitan ditunjukkan oleh Rajah 2.13. Litar ini dikembangkan dengan cara menggantikan sumber voltan bekalan V_m dengan galangan beban Z_L yang tersambung siri dengan pemuat siri $X_s (= 1/\omega_b C_s)$ dalam belitan utama, dan selari dengan pemuat ujaan $X_{sh} (1/\omega_b C_{sh})$ dalam belitan sokongan. Hal ini ditunjukkan oleh Rajah 2.14.